

Fluß zur Verfügung zu stellen. Dies erfordert bei großen Polteilungen einen hohen Materialaufwand. Bei der Suche nach günstigeren Anordnungen fand Laithwaite im Jahre 1969 das Konzept des transversalen Flußverlaufes, bei dem die Jochhöhe nur von der Polbreite, nicht jedoch von der Polteilung abhängt. Diese Eigenschaft wurde beim Bau von Linearmotoren vorteilhaft ausgenutzt.

Während die Polwicklung nach Prinzip c die gleichen Nachteile wie beim longitudinalen Konzept aufweist, ergibt sich bei rotierenden Maschinen mit einer Anordnung nach d eine besonders einfache Art der Wicklung als Ring. Er umschließt alle Pole gemeinsam in Umfangsrichtung, besitzt keine Wickelköpfe und läßt sich leicht herstellen. Zunächst schien das neue Konzept bei rotierenden Maschinen nicht sinnvoll zu sein, weil dort nicht der Bedarf nach großen Polteilungen bestand. Daher offenbarten sich anfänglich noch nicht alle Vorteile der neuen Flußführung. Erst Weh erkannte einige Jahre später die zusätzlichen Möglichkeiten beim Übergang zu kleinen Polteilungen und übertrug das Prinzip d auf rotierende Maschinen. Auf diese Weise konnte er sehr hohe Kraftdichten erzielen. Dabei kamen ihm die Weiterentwicklungen bei den hartmagnetischen Werkstoffen zugute, denn insbesondere bei Polteilungen von 1 bis 2 cm ist eine elektrische Erregung vom Aufwand her nicht zu vertreten. Mit der Einführung von Seltenerd-magneten wurden Remanenzinduktionen über 1 Tesla möglich. Die Meßergebnisse an den Prototypen waren insbesondere bezüglich der Kraftdichte sehr vielversprechend. Die Forschungsarbeiten verfolgten in dieser Phase im wesentlichen die Optimierung der Maschinenausnutzung, während eine fertigungsgerechte Gestaltung des mechanischen Aufbaus wenig Beachtung fand.

2.3.2 Prinzipieller Aufbau und Funktion

Bei herkömmlichen Maschinen nach dem Longitudinalflußkonzept muß der zur Verfügung stehende radiale Gesamtquerschnitt des Ständers in flußführenden Eisenquerschnitt und stromführenden Kupferquerschnitt aufgeteilt werden, weil sie in derselben Ebene liegen. Dies führt zu einer gegenseitigen Behinderung bei der Auslegung. Wird beispielsweise der Zahnquerschnitt vergrößert, um bei gleichem Ständerfluß die Induktion und damit die Eisenverluste zu verringern, müssen gleichzeitig die Nuten schmäler ausgeführt werden, wodurch die Stromdichte und so auch die Kupferverluste ansteigen. Während die Eisenverluste im wesentlichen drehzahlabhängig sind und auch schon im Leerlauf auftreten, sind die Kupferverluste stark von der Belastung der Maschine abhängig. Für einen bestimmten Betriebspunkt oder ein bekanntes Lastprofil kann die Summe der Verluste durch angepaßte Querschnitte von Nut und Zahn minimiert werden.

Bei der Transversalflußmaschine ist die Ebene für den magnetischen Fluß um 90° gegenüber der klassischen Anordnung gedreht und liegt damit senkrecht (transversal) zur Bewegungsrichtung. Gestaltet man die Ständerwicklung als Ring, wie es Abbildung 2.2 d zeigt, sind die Geometrieparameter der Nut und der Zahnbreite weitgehend voneinander entkoppelt. Damit können große Ankerstrombeläge realisiert werden, ohne daß die Verluste ansteigen. Die Darstellung der

einzelnen Maschinenkonfigurationen in diesem Kapitel erfolgt der Übersichtlichkeit halber in linearer Bauweise. In Kapitel 2.3.5 werden dann die Erkenntnisse auf rotierende Maschinen übertragen.

Die einfachste Ausführung einer Transversalflußmaschine ist in Abbildung 2.3 gezeigt. Der Wicklungsstrang wird von U-förmigen Weicheisenteilen umschlossen, die in Bewegungsrichtung im Abstand einer doppelten Polteilung angeordnet sind. Sie sollen im folgenden als U-Joche bezeichnet werden. Die offenen Enden dieser U-Joche sind auf den Luftspalt gerichtet und bilden die Pole des Ständers. Ihnen gegenüber im Luftspalt sind Permanentmagnete so angeordnet, daß die beiden Plättchen, die den Polen eines Jochs gegenüberstehen, entgegengesetzte Polarität besitzen. Da die Polteilungen in Ständer und Läufer gleich groß sind, wird ein Fluß erzeugt, der in allen U-Jochen die gleiche Richtung besitzt. Die Summe aller Jochflüsse entspricht der Flußverkettung der Wicklung. Bewegt man den Läufer um genau eine Polteilung weiter, ändert der Ständerfluß sein Vorzeichen.

Grundsätzlich sind Transversalflußmaschinen auch mit elektrischer Erregung herstellbar. Die Vorteile der Topologie kommen aber erst beim Übergang zu kleinen Polteilungen zum Tragen. Dies erfordert einen sehr hohen Aufwand für eine elektrische Erregereinheit. Um die erforderliche Leistung auf den Rotor zu übertragen, müssen zudem Schleifringe vorgesehen werden, die Bauvolumen beanspruchen und mechanischem Verschleiß unterliegen. In dieser Arbeit werden daher nur permanenterregte Maschinen behandelt.

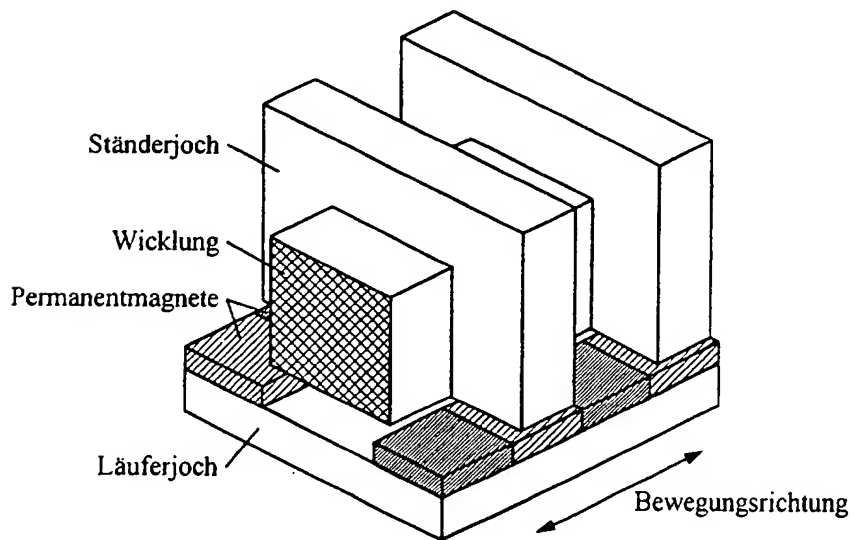


Abbildung 2.3: Grundidee der Transversalflußmaschine

Bei genauerer Betrachtung der Anordnung erkennt man, daß der magnetische Kreis nicht vollständig ist. Die Hälfte der Plättchen, die sich gerade zwischen den

Polen des Ständers befindet, hat keinen ferromagnetischen Rückschluß zur Verfügung. Der Fluß dieser Magnete schließt sich deshalb zum Teil über die benachbarten, entgegengesetzt polarisierten Plättchen, zum Teil streut er von der Seite in die Schenkel der U-Joche ein und schließt sich über die Wicklung. Beide Flußpfade sind dem Hauptfluß entgegengerichtet und verringern dadurch die wirksame Ständerflußverkettung beträchtlich.

Die Leistung der Maschine kann deutlich gesteigert werden, wenn man einen zusätzlichen Rückschluß einführt, der den oben erwähnten „Gegenfluß“ aufnimmt. Dieser Rückschluß kann nur im Ständer angeordnet werden, weil er immer die der Pollücke² gegenüberstehenden Magnete kurzschließen soll. Um für diese Zusatzelemente Platz zu schaffen, werden die Schenkel der vorhandenen Joche verlängert, so daß der Wicklungsstrang weiter vom Luftspalt abrücken kann. In die entstehende Lücke werden in der Mitte zwischen den U-Jochen weitere Weicheisenelemente eingefügt, die ihrer Form entsprechend im folgenden als I-Joche bezeichnet werden. Sie führen einen Fluß gleicher Größe wie die U-Joche, führen ihn aber unter der Ständerwicklung vorbei, so daß er nicht mit ihr verkettet wird. Die erweiterte Anordnung ist in Abbildung 2.4 gezeigt.

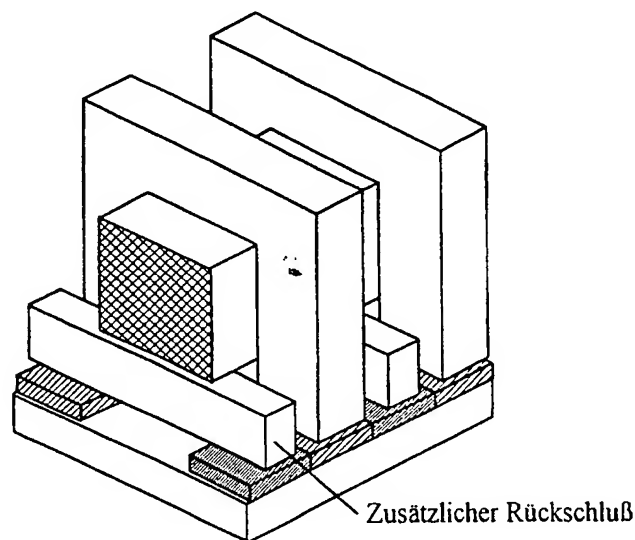


Abbildung 2.4: Transversalflußmaschine mit zusätzlichem Rückschluß

Durch das Einfügen der I-Joche entsteht ein zusätzlicher Streupfad für den Ständerfluß. Er verläuft nicht mehr nur durch die Magnetplättchen in den Läufern, sondern es bietet sich dem Fluß nun auch die Möglichkeit, aus der Seite der U-Joche auszutreten und sich über die I-Joche im Ständer zu schließen. Dadurch

² Bezogen auf die Pole der U-Joche.

wird die primäre Streuinduktivität erhöht und die Maschine erreicht schneller den Sättigungsbereich. Der Streufluß muß den magnetischen Widerstand zwischen den beiden Jochen überwinden. Durch eine Erhöhung desselben kann der unerwünschte Effekt vermindert werden. In den I-Jochen wird der volle Querschnitt nur in der Mitte der Anordnung benötigt, da der Fluß zur Außenseite des Stranges hin linear abnimmt. Aus diesem Grunde kann die Oberseite der beiden Enden dreieckförmig abgeschrägt werden, ohne daß sich Induktionsüberhöhungen ergeben. Der für den Ständerstreufluß wirksame Querschnitt wird durch diese Maßnahme auf die Hälfte verkleinert.³ Die Geometrie der veränderten Bauform ist in Abbildung 2.5 zu sehen.

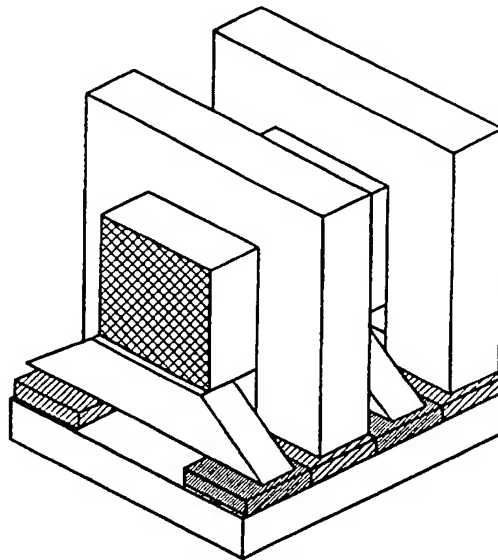


Abbildung 2.5: Abschrägung der I-Joche

Die transversal verlaufenden Flüsse der beiden versetzten Ständerjoche schließen sich in einem gemeinsamen Rotorjoch. Sie haben gleiche Amplitude, aber entgegengesetztes Vorzeichen. In der Mitte zwischen den Magnetreihen heben sich die Flüsse daher auf, es gibt keine resultierende Induktion. Abbildung 2.6 zeigt einen Blick auf die Unterseite des Modells und veranschaulicht diesen Sachverhalt. Das ferromagnetische Material kann daher im Bereich zwischen den Polreihen weggelassen werden, ohne daß sich am Feldverlauf etwas ändert.⁴ Zum einen ergibt sich eine deutliche Materialeinsparung, zum anderen wird die Blechung des Rotorjochs

³ Diese Maßnahme wird in Kapitel 3.7 mit Hilfe der numerischen Feldberechnung noch quantitativ untersucht werden.

⁴ Dies konnte auch durch eine vergleichende Feldberechnung nachgewiesen werden.

erleichtert. Auf die Gründe für die Notwendigkeit, das Rotorjoch zu blechen, wird in einem späteren Kapitel eingegangen.

Der so entstehende Aufbau wird in dieser Arbeit erstmalig behandelt und stellt einen wichtigen Schritt für die praktische Ausführung der Maschine dar. Im folgenden werden nur noch diese Modelle mit dem geteilten Rotorjoch behandelt, wie es in Abbildung 2.7 zu sehen ist.

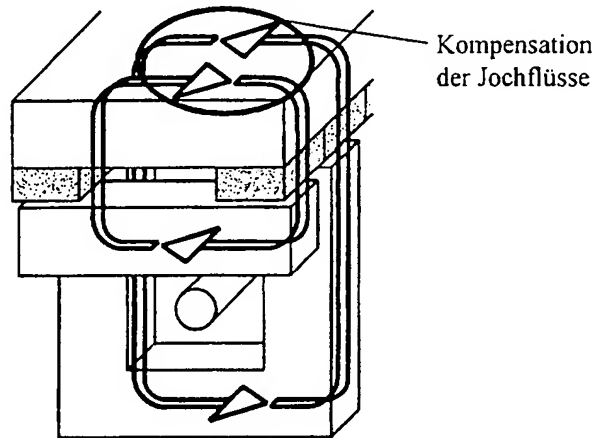


Abbildung 2.6: Bauform gemäß Abbildung 2.4, Flußkompensation im Rotorjoch

2.3.3 Permanenterregung mit und ohne Flußführung

Der Aufbau der Erregung im Läufer kann entweder ausschließlich mit Magnetmaterial oder in Kombination mit Weicheisenelementen erfolgen. In der Literatur werden für die beiden Varianten häufig auch die Bezeichnungen Flachmagnetanordnung und Sammleranordnung benutzt. Diese Wortwahl ist nicht ganz treffend, dient doch zur Erzeugung des Erregerflusses in beiden Fällen ein flaches Magnetplättchen, dessen Seitenverhältnisse sich in den beiden Ausführungen nicht wesentlich voneinander unterscheiden.

Passender ist es, die beiden Varianten wie in der Überschrift angegeben zu bezeichnen; denn das entscheidende Merkmal der zweiten Lösung liegt im Einsatz von weichmagnetischem Material zwischen den Dauermagneten als Leitstücke, die den magnetischen Fluß um 90° umlenken und bei einem geeigneten Seitenverhältnis gleichzeitig durch Querschnittsverjüngung die Flußdichte erhöhen. Dadurch werden Luftspaltinduktionen ermöglicht, deren Wert über dem der Remanenzinduktion des Magnetwerkstoffes liegt. Zum anderen wird durch die Querschnittsveränderung im magnetischen Kreis der scheinbare Luftspalt verkleinert, was die Streuverhältnisse des Ständerkreises günstig beeinflusst, gleichzeitig aber auch die Maschineninduktivität erhöht. Dies kann bei hohen Speisefrequenzen das Einprä-

gen der Strangströme erschweren und die Betriebsdynamik verschlechtern. Die beiden Varianten sind in Abbildung 2.7 und Abbildung 2.8 zu sehen. Dabei sind nur die magnetisch aktiven Teile gezeichnet, auf die Darstellung der Trägerkonstruktion wird aus Gründen der Übersichtlichkeit in diesem Kapitel verzichtet.

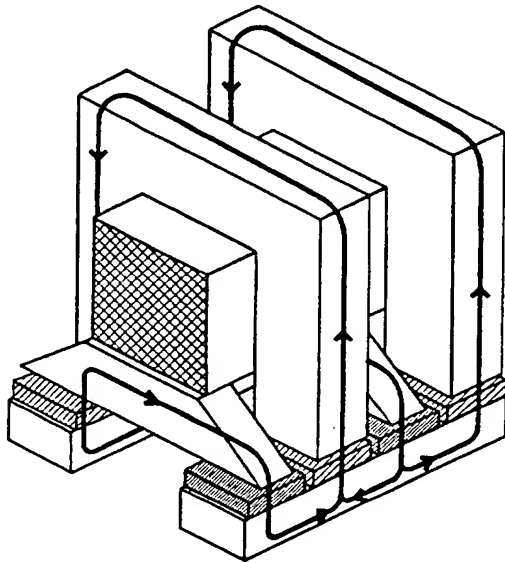


Abbildung 2.7: Anordnung ohne Flußführung

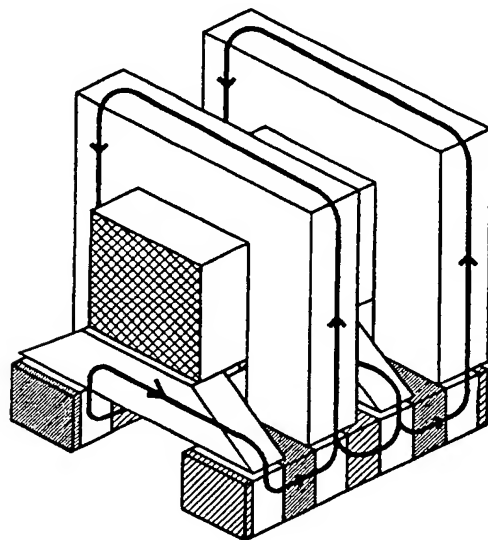


Abbildung 2.8: Anordnung mit Flußführung

Ohne Flußleitstücke muß der Träger der Dauermagnete aus magnetischem Material bestehen, um den Erregerfluß zu schließen, während er bei der Anwendung der Flußführung nicht magnetisch sein darf, weil sonst der Erregerfluß kurzgeschlossen wird. Dies ist bei der Auswahl der Trägerwerkstoffe zu beachten.

2.3.4 Einseitige und doppelseitige Bauform

Die Magnetanordnung kann entweder einseitig auf einen Ständer wirken oder zwischen zwei gleichartigen Ständern angeordnet werden. Dies hat für die beiden in Kapitel 2.2 angegebenen Varianten unterschiedliche Konsequenzen. Ohne Flußführung ersetzt der zweite Ständer den Weicheisenrückschluß des Läufers (Abbildung 2.9). Die Durchflutung der beiden Wicklungen besitzt die gleiche Phasenlage, wodurch sich in beiden Luftspalten ein Flächenschub gleicher Größe ausbildet. Die auf den Läufer wirkende Gesamtkraft ist genau doppelt so groß wie bei der einseitigen Anordnung. Problematisch ist die mechanische Befestigung der Magnete, weil sie nur von der Seite her gehalten werden können. Seltenerdmagnete sind sehr spröde und daher keinen großen Biegebeanspruchungen gewachsen, was zu einer geringen Stabilität des Läufers führt.

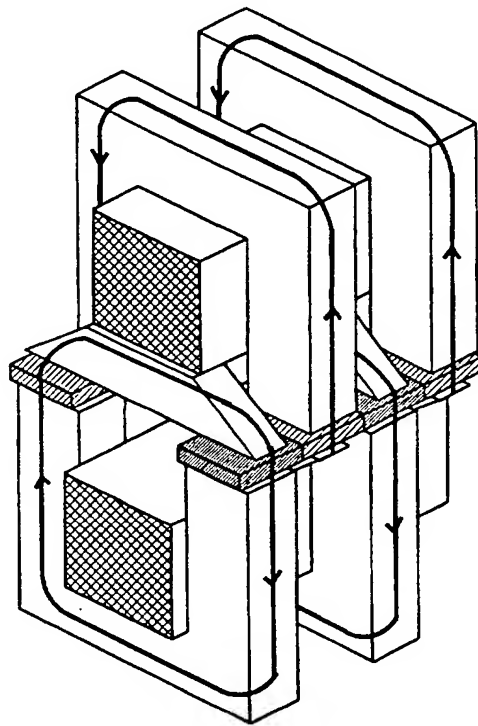


Abbildung 2.9: Doppelseitige Anordnung ohne Flußführung